Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 3, July-August 2020, p. 515-532

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۹، ص. ۵۳۲-۵۱۵

مقاله علمی-پژوهشی

طراحی و تحلیل رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه

محمدحسن نادری[۱]- مهدی ذاکری‌نیا[۲]*- میثم سالاری جزی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴

چکیده

در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه پایدار منابع آب در حوضه های آبخیـز، درک، توصیـف و طراحـی رژیـم جریـان، نقـش مهمـی در برقـراری تعـادل فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی و تداوم حیات اکوسیستم‌های رودخانه ای دارد. جریـان اکولـوژیکی پایـه و اسـاس حفاظـت از زیسـتگاه ماهیـان رودخانه‌ای و از ارکان مدیریت اکوسیستم رودخانه است که بایستی به رسمیت شناخته شود، امـا بـدان اهمیـت خاصـی داده نمـی‌شـود. پـایش جریـان زیست‌محیطی در طول رودخانه، برای اطمینان از انتقال و توزیع جریان مطلوب اکولوژیکی مورد نیاز به اکوسیستم‌های آبی پایین‌دست، ضروری است. از این رو در پژوهش حاضر به منظور ایجاد شرایط پایدار اکولوژیک در رودخانه زرین‌گل استان گلستان، طی محاسبات گام به گام تحلیـل اکوهیـدرولیکی زیستگاه گونه سیاه‌ماهی *Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) و تحلیل جریان اکولوژیکی بـا اسـتفاده از روش‌هـای هیـدرولوژیکی تنانـت و انتقال منحنی تداوم جریان و مدل شبیه‌سازی زیستگاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با انجام شبیه‌سازی هیـدرولیکی و آنـالیز سـری زمـانی دبی- فیزیک زیستگاه با استفاده از منحنی‌های شاخص مطلوبیت، محدوده رژیم جریان موردنیاز برای تأمین پتانسیل اکولوژیکی زیستگاه گونه شـاخص، بین ۲/۴۹ و ۰/۵۸ مترمکعب برثانیه به ترتیب در ماه‌های فروردین و آبان، با میانگین دبی سالانه ۱/۲۵ مترمکعب برثانیه (معادل ۵۹ درصد جریان طبیعی رودخانه) می‌باشد. همچنین مقایسه میزان تخصیص آب برای تأمین جریان زیست‌محیطی با روش تنانت در رودخانـه مـورد مطالعـه نشـان داد، کمبـود جریان در فصول تابستان و زمستان (جریان رودخانه کمتر از جریان زیست‌محیطی است) مشاهده مـی‌شـود. در نهایـت ایـن نتیجـه بـه عمـل آمـد کـه روش‌های دیگر تأمین جریان زیست‌محیطی (انتقال منحنی تداوم جریان و شبیه‌سازی زیستگاه)، مقادیر بالاتر از ۳۰ درصـد میـانگین جریـان سـالانه را فراهم می‌کند، که محافظت بهتر جریان را برای زیستگاه رودخانه فراهم می‌کنند. بر اساس نتایج ایـن مطالعـه، توزیـع مطلوبیـت زیسـتگاهی در طـول رودخانه زرین‌گل، تحت تأثیر پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و میزان دبی جریان، بیـانگر شـرایط مطلـوب زیسـتگاهی گونـه سـیاه‌مـاهی در محـدوده پایین‌دست و شرایط ضعیف در محدوده بالادست رودخانه می‌باشد. در نهایت، رویکرد مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سـازی زیسـتگاه، نسـبت بـه روش‌هـای هیدرولوژیکی بسیار انعطاف‌پذیرتر بوده و می‌تواند برای تجزیه و تحلیل‌های میزان مطلوبیت زیسـتگاه ماهیـان در مـدیریت اکوسیسـتم رودخانـه، مـورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: جریان زیست‌محیطی، رودخانه زرین‌گل، سیاه‌ماهی، مساحت قابل استفاده وزنی، مطلوبیت زیستگاه

مقدمه

از مهم‌ترین اصول در یکپارچه‌سازی موضوعات مربوط به مدیریت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و رژیم جریان آب، برقراری تعادل پایدار در شرایط اکولوژیکی رودخانه‌ها و در حداقل نگه‌داشتن آسیب وارده بـه بخش‌های محیط‌زیستی آبی است. رژیم هیـدرولوژیکی جریـان، یـک عامل کنترل کننده پارامترهای کلیدی زیستگاه رودخانه مانند عمـق و سرعت آب بوده و همچنین نقش کلیدی در شکل‌گیری تنوع‌زیستی و حفـظ، سـلامت و پایـداری اکوسیسـتم رودخانـه دارد (۵، ۸ و ۲۹). جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه به عنوان مهم‌تـرین اجـزای رژیـم اکولوژیکی می‌باشند. جریان زیسـت‌محیطـی را مـی‌تـوان ابـزاری بـه منظور اعمال مدیریت صحیح زیست‌محیطی، کنترل آلودگی منابع آب و حفظ اکوسیستم رودخانه در چهارچوب مدیریت جـامع حوضـه‌هـای آبخیـز در نظـر گرفـت (۴، ۱۵ و ۲۵). بـرای تخمـین حـق‌آبـهٔ زیسـت‌محیطـی رودخانـه‌هـا در مـدیریت پایـدار منـابع آب و حفـظ

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشـد مهندسـی منـابع آب، دانشـیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
(*- نویسنده مسئول: Email: mzakerinia@gau.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i3.79294

اکوسیستم‌های موجود در حوضه‌های آبخیز، روش‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و هیدرولیکی و انعطاف‌پذیری و سازگاری با منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد (۴، ۲۵ و ۲۶). با توجه به اثرات زیان‌بار تغییرات رژیم‌های طبیعی جریان رودخانه‌ها توسط سدها و دیگر سازه‌های آبی و تهدید اکوسیستم‌های آبی وابسته به رژیم جریان رودخانه، نیاز به یک راه‌حل جامع برای مدیریت اکوسیستمی رودخانه می‌باشد. نیاز دینامیک اکوسیستم رودخانه، پایه گذار علم جدیدی تحت عنوان اکوهیدرولیک شده است. تحقیقات حوزهٔ اکوهیدرولیک در زمینه تحلیل ارتباطات پیچیده میان عوامل مختلف تأثیرگذار بر اکوسیستم آبی، درک و مدلسازی عملکرد شبکه رودخانه‌ای به عنوان راهروهای زیست‌محیطی برای مهاجرت گونه‌های ماهیان، عملیات آزمایشگاهی و میدانی برای ایجاد یک چارچوب یکپارچه اکوهیدرولوژیکی برای حفاظت از تنوع زیستی در حوضه رودخانه، تاکنون پیشرفت داشته است (۶ ، ۱۶، ۱۷ و ۲۳).

محققین بسیاری به تحلیل مباحث مربوط به شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای و برآورد جریان زیست‌محیطی در جهان پرداخته‌اند. در ادامه به نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده پرداخته می‌شود. در پژوهشی بورگیس و همکاران (۸) رابطه بین پراکنش و مساحت قابل استفاده وزنی[1] ماهی قزل‌آلا در رودخانه کاتاماران بروک کانادا را با مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه[2] مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد، با اجرای سناریوهای مختلف جریان، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی در زیستگاه‌های مختلف در ۸۵ درصد متوسط جریان سالیانه[3] می‌باشد. در تحقیقی دیگر، وای و همکاران (۲۸) با مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه آبزیان با استفاده از مدل یک بعدی شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه (PHABSIM)، نشان دادند در پروژه‌های احیا و باززنده‌سازی زیستگاه[4] رودخانه، با ارزیابی شاخص مطلوبیت زیستگاه در مراحل مختلف زندگی گونه شاخص، بایستی اقدامات لازم جهت تنظیم جریان اکولوژیکی را به‌عمل آورد. ناکاواچارا و همکاران (۱۹) در مطالعه ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه ناخون نایوک تایلند با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و مدل شبیه‌سازی زیستگاه بیان کردند، برای حفاظت از زیستگاه رودخانه، رویکردهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، رژیم جریان زیست‌محیطی را خیلی زیاد و یا خیلی کم برآورد کرده در حالی‌که مدل شبیه‌سازی زیستگاه، نیازهای اکولوژیکی را با توجه به شرایط بیولوژیکی و تعاملات موجودات آبزی در رودخانه پیشنهاد داده است. وانگ و همکاران (۲۷) از مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه با استفاده از حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی برای تعیین جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست رودخانه یانگ‌تسه چین برای ده گونه شاخص ماهی بومی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد، رژیم اکولوژیکی مورد نیاز بدست آمده از این روش معادل ۲۳۹۵ مترمکعب بر ثانیه برای تأمین و حفاظت از زیستگاه رودخانه می‌باشد.

در ایران نیز مطالعات اندکی در مورد کاربرد روش‌های مختلف هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و نیز مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه‌ای در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی رودخانه انجام شده است: از جمله، نیک‌قلب و همکاران (۲۰) برآورد رژیم اکولوژیکی جریان رودخانه کاظم‌رود واقع در جنوب‌غربی دریای خزر برای ماهی زرده‌پر *Luciobarbus capito* با روش شبیه‌سازی زیستگاه، صدیق‌کیا و همکاران (۲۳) شبیه‌سازی اکولوژیکی- هیدرولیکی زیستگاه ماهی قزل‌آلای خال قرمز *Salmo trutta* در رودخانه‌های الرم، آب سفید و دلیچای واقع در پارک ملی لار در حوضه‌جنوبی دریای‌خزر با مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، نادری و همکاران (۱۵) بکارگیری مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM جهت تأمین حداقل شرایط زیستگاه گونه سیاه‌ماهی *Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) در رودخانه قره‌سو استان گلستان، مصطفوی و یاسی (۱۴) تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی با استفاده از روش‌های اکوهیدرولوژیکی به منظور حفاظت از اکوسیستم رودخانه باراندوزچای، زرعکانی و شکوهی (۲۹) معرفی رژیم جامع اکولوژیکی رودخانه آزارود در حوضه چالوس با روش اجزای سازنده، صدیق‌کیا و همکاران (۲۲) برآورد جریان زیست‌محیطی حوضه آبخیز سیمین‌دشت استان تهران با اصلاح روش تنانت و محیط خیس‌شده، و اسماعیلی و همکاران (۱۰) برآورد حقابه محیط زیستی رودخانه گرگانرود با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، می‌توان اشاره کرد.

با توجه به جدید بودن علم مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای در جهان، مطالعات اندکی در زمینه تعیین رژیم جریان زیست‌محیطی با مدل‌های اکوهیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه‌ای (PHABSIM) در کشور ایران صورت گرفته است. بر این اساس در پژوهش حاضر جهت برنامه‌ریزی و مدیریت اکوسیستمی رودخانه زرین‌گل استان گلستان، سعی می‌شود ضمن پیاده‌سازی و ارزیابی رژیم جریان زیست‌محیطی با روش‌های مختلف هیدرولوژیکی (تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان) و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه، راهی نو را بر اساس نتایج این تحقیق دقیق‌تر و سازگارتر با شرایط جریان رودخانه‌ای، معرفی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

1- Weighted Usable Area: WUA
2- Physical HABitat SIMulation: PHABSIM
3- Mean Annually Flow: MAF
4- Habitat Restoration Projections

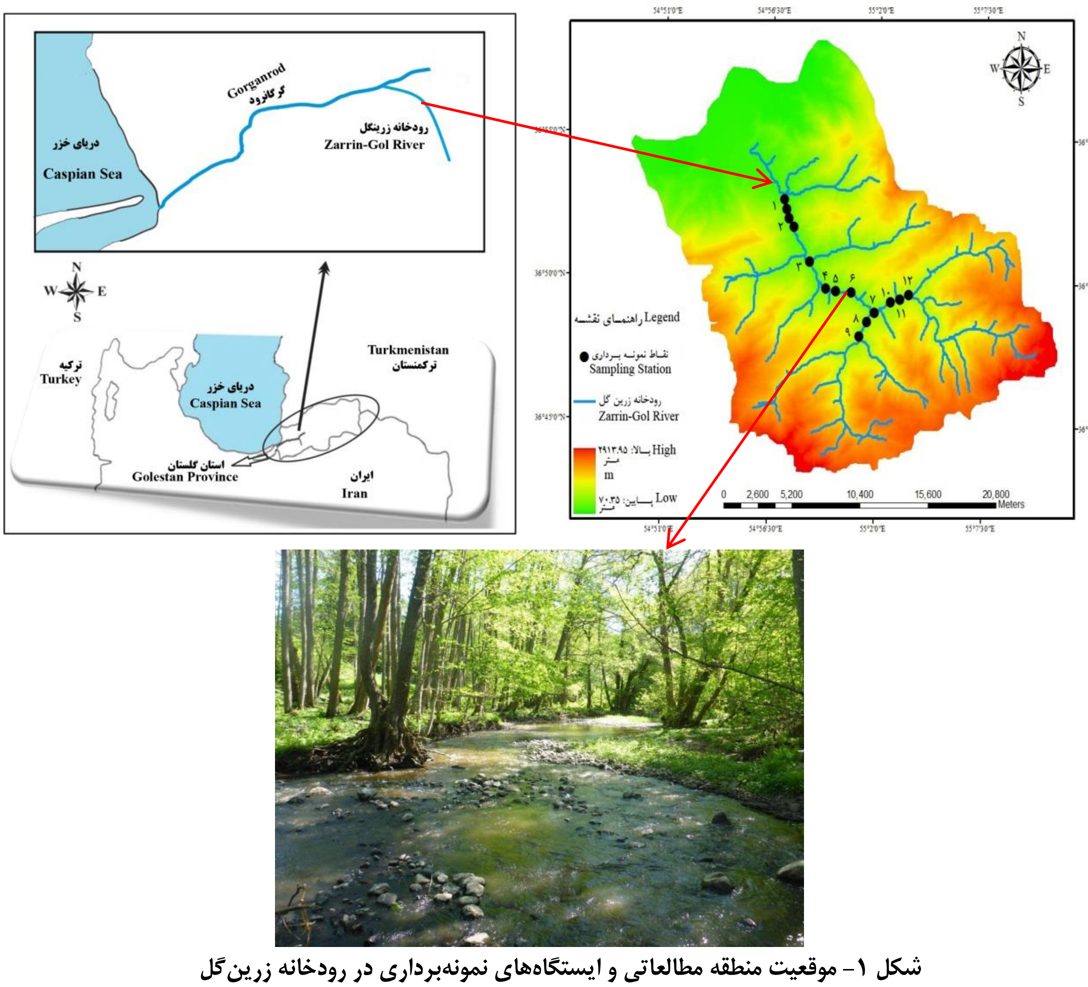
حوضهٔ آبخیز زرین‌گل به‌عنوان حوضه‌ای مرطوب در جنوب‌شرقی شهرستان علی‌آبادکتول استان گلستان، در مختصات جغرافیایی "۳۰ '۴۳ °۳۶ تا "۳۰ '۵۴ °۳۶ عرض شمالی و "۱۰ '۵۳ °۵۴ تا "۳۶ '۱۱ °۵۵ طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). این حوضه با حداکثر و حداقل ارتفاع ۲۹۹۷ و ۲۸۰ متر با میانگین ارتفاعی ۱۵۳۵ متر از سطح دریا، دارای شیب متوسط ۱۲ درصدی می‌باشد. رودخانهٔ زرین‌گل به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های گرگانرود، به طول ۲۲ کیلومتر و با بستر سنگی-شنی، از ارتفاعات سرخان، میلان، آقند و کمر، سرچشمه گرفته و در حوالی روستای باغ‌یلمه‌سالیان به رودخانهٔ گرگانرود می‌پیوندد.

رودخانهٔ زرین‌گل از جمله رودخانه‌های دائمی استان گلستان است که از آبدهی مناسب و سیلاب بالایی برخوردار است و در اواخر فصل زمستان و اوایل بهار فصل به علت بارش‌های فصلی باران و همچنین ذوب برف‌ها در ماه‌های اسفند و فرودین، قابلیت سیلابی شدن را دارد (۱۶ و ۱۷). رودخانهٔ زرین‌گل با توجه به دانه‌بندی ذرات بستر از جمله رودخانه‌های با بستر درشت‌دانه است و دارای پراکنش گونه‌ای مختلف ماهیان بومی منطقه می‌باشد (۱۱، ۱۲ و ۲۴). بر اساس آمار و اطلاعات دوره ۴۲ ساله (۱۳۹۵-۱۳۵۳) ایستگاه هیدرومتری زرین‌گل از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان که در ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی واقع شده است، متوسط آبدهی سالانه، حداکثر و حداقل دبی به ترتیب معادل ۲/۱۱، ۵/۹۳ و ۱/۰۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

روش‌های استفاده شده درتعیین جریان زیست‌محیطی

روش‌های هیدرولوژیکی

تنانت (۲۶) جریان‌های مشخصی که هر یک معرف کیفیت زندگی ماهیان بودند را در غالب سه پارامتر عمق، سرعت و درصد محیط خیس شده همراه با ملاحظات بیولوژیکی و تفرج برای زندگی ماهیان به صورت زیستگاه بقای کوتاه مدت، زیستگاه حیاتی و زیستگاه عالی برای بقاء تعریف کرد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه زرین‌گل

Figure 1- Location of the study area and sampling stations in Zarrin-Gol river

زیستگاه حیاتی کوتاه‌مدت، با حفظ ۱۰ درصد جریان متوسط سالانه باقی می‌ماند. زیستگاه حیاتی در ۳۰ درصد جریان متوسط سالانه و زیستگاه عالی برای حیات در جریان‌های بیش از ۶۰ درصد متوسط سالانه احراز می‌شوند (۲۰، ۲۶ و ۲۹).

روش انتقال منحنی تداوم جریان[1] برای اولین بار توسط اسمختین و آنپوتاس (۲۵) به‌منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی در سامانه رودخانه معرفی شده است. در برآورد جریان زیست‌محیطی در روش انتقال منحنی تداوم جریان، از داده‌های دبی جریان ماهیانه رودخانه استفاده‌شده و بر مبنای منحنی تداوم جریان طبیعی و موجود رودخانه، منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی برای هر کلاس موردنظر از مدیریت زیست‌محیطی تعیین می‌گردد (۱۴). برای محاسبه جریان زیست‌محیطی از روش تغییر منحنی تداوم جریان از اولین نسخه نرم‌افزار GEFC[2] استفاده می‌شود. در این روش چهار مرحله اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از: ۱) شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود، ۲) تعریف کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی، ۳) تولید منحنی‌های تداوم جریان زیست‌محیطی و ۴) تولید سری زمانی جریان زیست‌محیطی ماهیانه (۱۴ و ۲۵).

روش شبیه‌سازی زیستگاه

شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای، یکی از جنبه‌های مهم در علم هیدرولیک زیستی محسوب می‌گردد. اولین مدل تجاری مهم در زمینه شبیه‌سازی زیستگاه، مدل هیدرولیکی-زیستگاهی PHABSIM می‌باشد. PHABSIM یک مدل اکوهیدرولیکی است که مجموعه‌ای از ابزار را برای مدل‌سازی هیدرولیکی مطلوبیت زیستگاه‌های ماهیان فراهم می‌نماید که توسط مرکز مطالعات ژئوفیزیک آمریکا در دهه ۱۹۷۰ ارائه شد (۶، ۱۵ و ۲۳). عملکرد مدل به این صورت است که در ابتدا اطلاعات هیدرولیکی مربوط به رودخانه، شامل دبی، عمق و سرعت‌جریان و همچنین هندسه مقاطع معرف رودخانه وارد نرم‌افزار می‌شوند (۳، ۲۰ و ۲۷). زیرمدل هیدرولیکی نرم‌افزار به کمک این اطلاعات قادر است شرایط جریان را برای دبی‌های دلخواه شبیه‌سازی نماید. در منابعی مانند (۶)، (۱۵) و (۱۷) شرح تفصیلی این مدل آمده است. با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی و زیستگاهی، منحنی‌های دبی -فیزیک زیستگاه برای گونهٔ هدف در بازهٔ مورد مطالعه و در دورهٔ زیستی مورد بررسی، استخراج می‌شود و با داده‌های سری زمانی دبی جریان رودخانه ترکیب و در نهایت منحنی تداوم فیزیک زیستگاه ایجاد می‌شود. با توجه به منحنی تداوم فیزیک زیستگاه، سناریوهای

1- Flow Duration Curve Shifting: FDC Shifting

2- Global Environmental Flow Calculator

مختلف مدیریت جریان قابل اجرا بوده و تأثیر رژیم‌های مختلف جریان بر میزان زیستگاه در دسترس، مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی مدل PHABSIM، منحنی‌های مساحت قابل استفاده وزنی است. با داشتن دبی، میزان مساحت قابل استفاده وزنی برای تمامی دوره‌های هیدرولوژیکی قابل استخراج خواهد بود (رابطه ۱).

$$WUA = \left[\frac{(\sum_{i=1}^{n} A_I \times CSI_i)}{L}\right] * 1000 \quad (1)$$

$$CSI = SI_d \times SI_v \times SI_b \quad (2)$$

که در روابط فوق: A_i: سطح هر سلول زیستگاهی، CSI_i شاخص مطلوبیت ترکیبی[3] هر سلول، L طول بازه، WUA (مساحت قابل استفاده وزنی) تابعی از Q (دبی جریان) و SI_i شاخص مطلوبیت[4] هر متغیر می‌باشند.

پارامترهای هیدرولیکی و ژئومورفیکی زیستگاه رودخانه

شکل بستر رودخانه، تأثیر مشخصی بر روی زبری بستر و در نتیجهٔ مقاومت جریان دارد. در واقع شکل بستر، تابعی از دبی عبوری، ژئومورفولوژی منطقه و نیروی هیدرودینامیک رودخانه است (۷ و ۱۳). اشکال مختلف بستر رودخانه به صورت خیزاب[5] و گوداب[6] می‌باشد (شکل ۲). بسترهای شامل توپوگرافی گوداب - خیزاب محل پرورش و تخم‌ریزی آبزیان از جمله ماهی‌ها می‌باشد (۲، ۵ و ۱۷). ماهیان رودخانه‌ای بر اساس سازگاری‌های رفتاری، فیزیولوژیکی و مورفولولوژیکی، زیستگاه خاصی را ترجیح می‌دهند که برای بقا و پایداری افراد و جمعیت‌ها، حائز اهمیت می‌باشند (۱۳ و ۳۰). شرایط هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها پیوسته در حال تغییر بوده و زیستگاه‌های متنوعی را برای ماهیان و دیگر آبزیان فراهم می‌سازد.

شکل بستر گوداب، شکل طبیعی بستر رودخانه است و با عمق زیاد و سرعت کم شناسایی می‌شوند و یک زیستگاه حیاتی برای موجودات آبزی و ماهیان به‌شمار می‌روند (۵، ۶ و ۹). این نوع بسترها نامتقارن بوده و در مجاورت تپه‌های شنی قرار دارند. همچنین گوداب ها در دبی‌های پایین، سرعت کمی دارند. زیستگاه خیزاب مناطق کم عمق رودخانه هستند و در رودخانه‌های با شیب تند تا ملایم و در دشت‌های سیلابی کاملاً توسعه یافته بین خمیدگی‌ها ایجاد می‌شوند و یکی از خصوصیات رودخانه‌های شنی محسوب می‌شوند (۱۸). در محل پیچ رودخانه، عموماً به دلیل فرسایش در مقطع رودخانه، زیستگاه گودآب تشکیل خواهد شد، در حالی‌که در مقاطع قبل پیچ

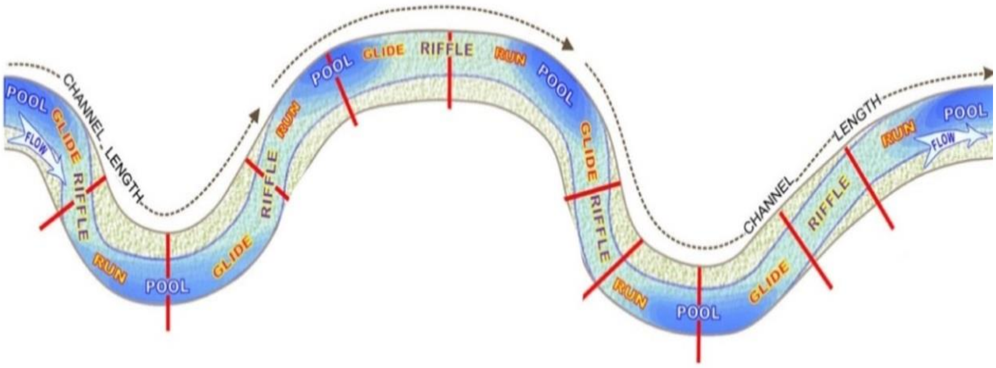
3- Combined Suitability Index

4- Suitability Index

5- Riffle

6- Pool

رودخانه که دارای پوشش اغلب قلوه‌سنگی هستند، زیستگاه خیزآب تشکیل می‌شود (۶).



شکل ۲- نمایش توالی‌های گوداب و خیزاب (۱٦)

Figure 2- Shows pool -riffle sequence (16)

ضریب زبری برای بررسی جنبه‌های اکولوژیک یک رودخانه در شبیه‌سازی شرایط جریان مرتبط با زیستگاه مناسب، نیز مهم می‌باشد (۱۳). ضریب زبری عمدتاً منعکس کننده مقاومت رودخانه در برابر جریان است که به جهت موثر بودن بر روی شرایط جریان رودخانه (تراز سطح آب و سرعت) مهم می‌باشد. مقدار ضریب زبری مانینگ با توجه به دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه زرین‌گل از طریق بازدید میدانی و روابط تجربی در روش چاو (که به قطر ذرات تشکیل دهنده جدار و بستر آبراهه بستگی دارد)، در طول رودخانه مورد مطالعه و در ایستگاه‌های انتخابی، بین ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۵ متفاوت می‌باشد و با توجه به اینکه عواملی همچون نامنظمی کناره‌ها و همچنین وجود پوشش گیاهی، زبری کناره‌ها را افزایش می‌دهد و دیگر شرایط حاکم بر رودخانه در مقاطع مختلف همچون درجه ناهمواری، وجود موانع و شکل مسیر، با استفاده از جداول تعیین ضریب زبری ونتی چاو و تطبیق آن با مشاهدات میدانی به‌عمل آمده در بازهٔ پایین‌دست مطالعاتی، مقدار این پارامتر در قسمت‌های انتهایی ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌دلیل وجود پوشش گیاهی در بستر رودخانه ۰/۰۳۵ منظور و به مدل معرفی گردیده است.

مطالعات میدانی اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی و اکولوژیکی

به‌طور کلی شاخص‌های اکوهیدرولیکی رودخانه عبارتند از شاخص‌هایی از هیدرولیک رودخانه که بر حیات آبزیان رودخانه مخصوصاً ماهیان و شرایط اکولوژیکی رودخانه مؤثر هستند. برای برقراری رابطه میان فرآیندهای هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی و اکولوژیکی در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، نیاز به منحنی‌های شاخص مطلوبیت زیستگاه[1] است (۱۶، ۱۷، ۲۸ و ۳۰). به‌دلیل نیاز به منحنی‌های مطلوبیت، با بازدیدهای میدانی و بهره‌مندی از نظرات متخصصان اکولوژی آبزیان، داده‌های مورد نیاز جهت برازش منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه مهیا شد. سنجش و اندازه گیری پارامترهای محیطی و هیدرولیکی (مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین‌دست، موقعیت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا، عمق، عرض و سرعت آب، ساختار بستر) و نمونه‌برداری از ماهیان (جهت تخمین سن و مرحله زندگی آن) از طریق صید الکتریکی[2]، جهت تولید منحنی‌های شاخص مطلوبیت در فصول مختلف سال ۱۳۹۶ از ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری (جدول ۱ و شکل ۱) با حضور تیم عملیاتی (متشکل از پژوهشگران اکولوژی آبزیان و مهندسی آب)، از پایین‌دست رودخانهٔ زرین‌گل به سمت بالادست انجام شد. در انتخاب ایستگاه مطالعاتی و نمونه‌برداری میکروزیستگاه، فاکتورهایی شامل قرار داشتن مرزهای محدوده مطالعاتی تحت تأثیر رژیم جریان (با بررسی نقشه توپوگرافی و نیز سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و الحاقیه HEC-GeoRAS)، دارا بودن هیدروگراف یکسان در نواحی دارای شرایط مشابه هیدرولوژیکی، تنوع در ریخت‌شناسی رودخانه (عرض کم رودخانه، گودال‌های مسیر رودخانه، زیستگاه‌های سنگلاخی و ایستگاه‌های گیاهی حاشیه رودخانه) و قطعه‌بندی نواحی هیدرولوژیکی به زیر نواحی ژئومورفولوژیکی که دارای هیدروگراف یکسان ولی شیب متفاوت باشند، مدنظر قرار گرفتند. در مجموع از ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری رودخانه زرین‌گل، گونه‌های سیاه‌ماهی، خیاطه، سگ‌ماهی جویباری و گاوماهی شنی

1- Habitat Suitability Curves: HSC
2- Electrofishing

خزری صید گردید (جدول ۲). جدول ۳، فراوانی ماهیان (قطعه در هـر متر مربع) در ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه زرین‌گل

Table 1- Geographic location and characteristics of sampling stations in Zarrin-Gol river

	Geographical Location موقعیت جغرافیایی		Environmental Parameters پارامترهای محیطی				
ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع از سطح دریا Above Sea Level (m)	سرعت Velocity (m/s)	عمق Depht (m)	عرض Width (m)	فرم مورفولوژی بستر Form morphology substrate
1	54° 93' 07"	36° 90' 41"	261.9	0.82	0.48	3.93	Pool
2	54° 93' 47"	36° 89' 98"	296.3	0.71	0.41	3.81	Pool
3	54° 94' 65"	36° 88' 68"	352.7	0.63	0.61	3.93	Pool
4	54° 95' 13"	36° 88' 18"	496.2	0.44	0.51	5.25	Pool
5	54° 95' 43"	36° 87' 46"	567.1	0.54	0.45	4.85	Riffle
6	54° 95' 55"	36° 87' 14"	639.8	0.66	0.48	4.64	Riffle
7	54° 96' 67"	36° 85' 91"	667.1	0.54	0.57	4.28	Pool
8	54° 96' 93"	36° 85' 29"	721.9	0.53	0.41	4.81	Riffle
9	54° 97' 02"	36° 84' 75"	848.5	0.72	0.38	5.93	Pool
10	55° 02' 28"	36° 81' 67"	916.7	0.92	0.53	5.81	Riffle
11	55° 03' 15"	36° 81' 45"	985.2	1.14	0.58	5.65	Riffle
12	55° 03' 49"	36° 81' 78"	1067.2	1.13	0.51	5.18	Riffle

جدول ۲- فراوانی (قطعه در متر مربع) ماهیان در فصول مختلف نمونه‌برداری رودخانه زرین‌گل

Table 2- Frequency (Piece /m^2) of fishs in sampling different stations Zarrin-Gol river

فصل/گونه Species/Season	گاوماهی شنی خزری ***Neogobius fluviatilis pallasi***	سگ‌ماهی جویباری ***Paracobitis malapterura***	ماهی خیاطه ***Albernoides eichwaldii***	سیاه‌ماهی ***Capoeta gracilis (Keyserling, 1861)***	کل Total
بهار (Spring)	0.07	0.15	0.7	0.7	1.62
تابستان(Summer)	0.09	0.45	0.98	1.11	2.63
پاییز (Autumn)	0.03	0.36	0.54	1.67	2.6
زمستان (Winter)	0.05	0.36	0.36	0.48	1.25

جدول ۳- راوانی (قطعه در متر مربع) ماهیان درایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری رودخانه زرین‌گل

Table 3- Frequency (Piece /m^2) of fishs in sampling different seasons Zarrin-Gol river

ایستگاه/گونه Species /Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
سیاه‌ماهی *Capoeta gracilis (Keyserling, 1861)*	0.074	0.215	0.234	0.227	0.099	0.01	0.01	0.047	0.001	0	0	0
ماهی خیاطه *Albernoides eichwaldii*	0.05	0.097	0.888	0.229	0.04	0.056	0.004	0.003	0	0	0	0
سگ‌ماهی جویباری *Paracobitis malapterura*	0.015	0.072	0.057	0.028	0.044	0.185	0.017	0.063	0.002	0.017	0.099	0
گاوماهی شنی خزری *Neogobius fluviatilis pallasi*	0	0	0.131	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0
کل Total	0.139	0.384	1.309	0.564	0.184	0.251	0.031	0.113	0.003	0.017	0.099	0

انتخاب مدل بیولوژیک

مطالعه فراوانی سیاه‌ماهی در فصول و ایسـتگاه‌هـای مختلـف بـه خوبی نشان می‌دهد این گونه در اکثر ایسـتگاه‌هـای مطالعـاتی قابـل مشاهده است که خود گواهی بر قـدرت تحمـل وسـیع سـیاه‌مـاهی و قابلیت شنای بالای این ماهی برای مهـاجرت‌هـای درون رودخانـه‌ای است. گونهٔ سیاه‌ماهی *Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) از

خانواده کپورماهیان و یکی از گونه‌های غالب و بومی حوضهٔ آبخیز جنوبی دریای‌خزر و از لحاظ حفظ ذخایر ژنتیکی، صید ورزشی و مطالعه جغرافیای جانوری حائز اهمیت است (۱ و ۲۴). حداکثر طول کل سیاه‌ماهی ۳۵ سانتی‌متر و بیشینه وزن آن ۲۲۵ گرم و میانگین طول کل ۲۲ سانتیمتر و میانگین وزن آن ۷۵ گرم است. تولیدمثل سیاه‌ماهی عمدتاً در فصل بهار از اسفندماه تا تیرماه صورت می‌گیرد. تخم‌ریزی در ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری آب در شن و ماسه و بر روی تخته سنگ‌ها رخ می‌دهد. تخم‌ریزی در حال حرکت در داخل آب اتفاق افتاده و تخم‌ها توسط شن و ماسه و یاسنگ‌های کوچک پوشانده می‌شوند (۱ و۲). بالغین این ماهی هرساله جهت تخم‌ریزی در داخل رودخانه محل زیست خود مهاجرت‌های تولیدمثلی دارند و از قسمت پایین‌دست به بالادست مهاجرت می‌کنند و پس از تخم‌ریزی دوباره به سمت پایین‌دست مراجعت می‌کنند (۱۵). همچنین از موجودات کفزی، لار، حشرات و گیاهان آبزی تغذیه می‌کنند. ترجیح زیستگاهی سیاه‌ماهی اعماق میانه با سرعت نسبتاً آرام و بسترهای سنگی با اندازه کوچک تا متوسط می‌باشد (۵). در این مطالعه، گونهٔ سیاه‌ماهی بنا به‌دلایل ذکر شده و همچنین پراکنش وسیع در رودخانهٔ زرین‌گل، به‌عنوان گونهٔ هدف انتخاب گردید.

نتایج و بحث

با کاربرد دو روش هیدرولوژیکی تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان، جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل، در ایستگاه هیدرومتری زرین‌گل محاسبه گردید که خلاصه نتایج آن در جدول ۴ و ۵ و مقادیر توزیع جریان زیست‌محیطی ماهانه این روش‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. در روش تنانت پیشنهاد شده است که پایین‌ترین حد ممکن برای نیاز آب زیست‌محیطی مطابق با شرایط بسیار ضعیف یک اکوسیستم رودخانه‌ای، ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه برای ماه‌های مهر تا اسفند و ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه برای ماه‌های فروردین تا شهریور در نظرگرفته شده قادر به حفظ وضعیت‌های بقای نسبتا قابل قبول است. نتایج پیشنهادی حاصل از روش تنانت در درصدهای مختلفی از متوسط جریان سالانه به عنوان جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل، در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق جدول ۴، برای آنکه وضعیت عادلانه‌ای (قابل قبول) در رودخانه زرین‌گل برقرار باشد، در شش ماه اول سال (برای فروردین تا شهریور)، باید جریانی معادل ۰/۶۳ متر مکعب برثانیه و در شش ماه دوم سال (برای مهرماه تا اسفند)، دبی برابر ۰/۲۱ متر مکعب برثانیه با میانگین ۰/۴۸ متر مکعب برثانیه در رودخانه زرین‌گل برقرار باشد.

روش انتقال منحنی تداوم جریان به عنوان یک روش ترکیبی هیدرولوژیکی- اکولوژیکی به منظور حفظ الگوی کلی تغییرپذیری جریان، جریان زیست‌محیطی را بر اساس دید اکولوژیکی در کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی مختلف با توجه به شرایط زیستی رودخانه و با استفاده از آمار دبی‌های ماهیانه ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی رودخانه ارائه می‌کند.

جدول ٤- جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل در ایستگاه هیدرومتری زرین‌گل با استفاده از روش تنانت

Table 4- Environmental Flow of Zarrin-Gol river hydrometry station using tennant method

شرح جریان Description of flows	روش تنانت Tennant method (% MAF)		جریان پیشنهادی Proposed flow (m^3/s)	
	مهر -اسفند October- March	فروردین -شهریور April- September	مهر -اسفند October- March	فروردین -شهریور April- September
شستشوی سریع Flushing	200		4.22	
محدوده بهینه Optimum range	60-100		1.26-2.11	
بسیارعالی Outstanding	40	60	0.84	1.26
عالی Excellent	30	50	0.63	1.05
خوب Good	20	40	0.42	0.84
قابل قبول Fair or degrading	10	30	0.21	0.63
ضعیف Poor or minimum	10	10	0.21	0.21
بسیار ضعیف Severe degradation	<10	<10	<0.21	<0.21

جدول ۵- کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی در روش انتقال منحنی تداوم جریان
Table 5- Environmental Management Classes in FDC Shifting method

کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی Environmental Management Classes	شرایط اکولوژیکی Ecological Condition	نیاز آبی زیست محیطی Environmental Water Requirement (% MAF)
A	طبیعی Natural	75.4
B	اندک تغییر یافته Slightly Modified	53.9
C	نسبتاً تغییر یافته Moderatly Modified	40.2
D	تا حد زیادی تغییریافته Largely Modified	35.5
E	آسیب‌دیدگی زیاد زیستگاه طبیعی Seriously Modified	31.1
F	تغییرات در سطح بحرانی Critically Modified	24.6

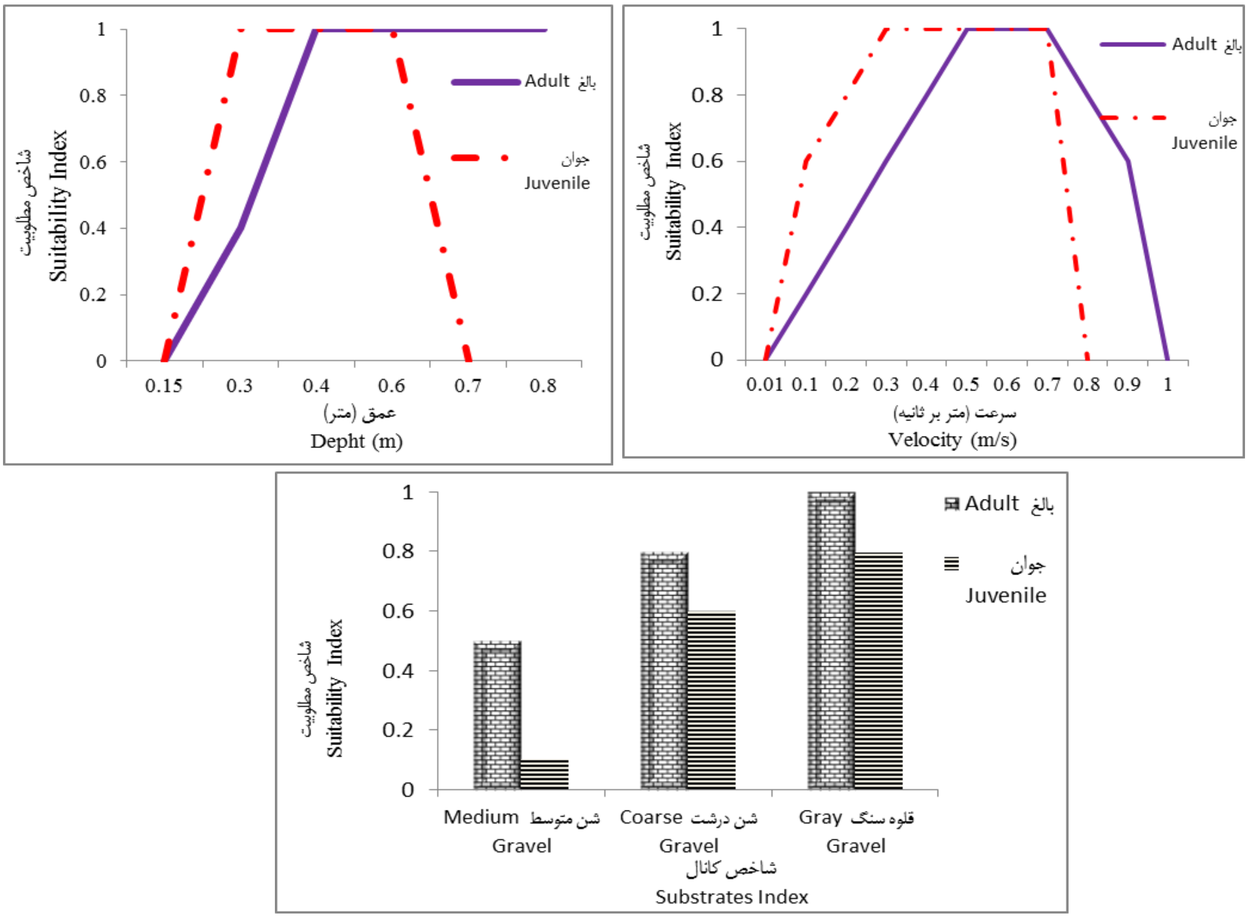
نتایج این روش در شش کلاس مدیریت زیست‌محیطی محاسبه شده در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵، برای حفظ رودخانه زرین‌گل در کلاس A (طبیعی)، ۷۵/۴ درصد متوسط جریان سالیانه، در کلاس B (اندکی تغییر یافته)، ۵۳/۹ درصد، در کلاس C (نسبتا تغییر یافته)، ۴۰/۲ درصد و در کلاس D (تا حد زیادی تغییر یافته)، که حداقل کلاس قابل قبول است، ۳۵/۵ درصد متوسط جریان سالیانه موردنیاز است. با بررسی منابع مطالعاتی مختلف، با توجه به طبقه‌بندی رودخانه به کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی مختلف، چون کلاس C از نظر اکولوژیکی دارای شرایط متوسط و مطلوبی بوده و در این کلاس دینامیک زیستگاه‌ها و اجزای جوامع زنده آبزی، نسبتاً تغییر یافته ولی عملکردهای اساسی اکوسیستم هنوز دست نخورده‌اند (۱۴ و ۲۵)، در این تحقیق به عنوان کلاس مدیریت مطلوب زیستی انتخاب شده است. در روش انتقال منحنی تداوم جریان هر چه کلاس مدیریت زیست‌محیطی بهتر باشد، میزان جریان زیست‌محیطی نیز بیشتر خواهد بود.

مصطفوی و یاسی (۱۴) و اسماعیلی و همکاران (۱۰) نیز در برآورد جریان زیست‌محیطی رودخانه های موردمطالعه‌شان، کلاس C در روش انتقال منحنی تداوم جریان را به عنوان حداقل وضعیت اکولوژیکی قابل قبول، گزارش کردند. از جمله مزایای روش‌های هیدرولوژیکی در برآورد رژیم جریان زیست‌محیطی اکوسیستم‌های آبی، کم هزینه و سریع بوده و بهترین و شاید تنها انتخاب کارشناسان در ارزیابی جریان زیست‌محیطی تحت شرایط کمبود داده می‌باشند. در حقیقت، تنها نیاز تمام روش‌های هیدرولوژیکی، داده‌های دبی رودخانه می‌باشد (۱۰، ۱۴، ۱۷ و ۲۶). معایب این روش‌ها، دقت کم، تعیین مقداری ثابت برای جریان مورد نیاز زیست‌محیطی در فصول آبی بدون درنظر گرفتن تغییرات طبیعی جریان و نوع و وضعیت موجودات زنده رودخانه و نیازهای اکولوژیکی در مراحل مختلف زندگی گونه هدف می‌باشد (۲۹).

در ادامه به منظور بررسی شرایط اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل، با توجه به مشاهدات میدانی، برای گروه سنی بالغ و جوان سیاه‌ماهی، منحنی‌های مطلوبیت فیزیک زیستگاه بر طبق روش ژاکوب توسعه داده شد (۲۱). در شکل ۳ منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی در مراحل مختلف زندگی گونه هدف، برای هر ۳ پارامتر اصلی عمق، سرعت و اندازه ذرات بستر نشان داده شده است. در تقسیم‌بندی ساختار بستر، با توجه به قطر سنگ‌های غالب اندازه‌گیری شده رودخانه در مطالعه میدانی، در محدودهٔ شن متوسط (۱۶-۸ میلی‌متر)، شن درشت (۱۲۸-۱۶ میلی‌متر) و شن بسیار درشت و شبیه قلوه‌سنگ (۲۵۶-۱۲۸ میلی متر) بودند.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش سن ماهی و در دوره بالغ گونه هدف اعماق و سرعت‌های بیشتری را نسبت به گروه سنی جوان ترجیح می‌دهد. یکی از دلایل این امر نیاز به پوشش برای این گروه سنی به عنوان پناهگاه استراحتگاه و ایستگاه‌های تغذیه می‌باشد که با افزایش عمق، توربولانس سطحی و زیرلایه‌ای که شامل مواد درشت‌تر می‌باشد، فراهم می‌شود و وضعیت مطلوبیت زیستگاه بهتر شده است. با افزایش عمق و سرعت جریان، مطلوبیت زیستگاه گروه سنی جوان کاهش می‌یابد و این گروه سنی اعماق و سرعت‌های کم‌تر را ترجیح می‌دهند، زیرا سرعت بالای جریان آب، سبب صرف انرژی ماهیان برای مقابله با شدت جریان و حفظ تعادل و شناوری در آب می‌شود. در حالت کلی مناسب‌ترین محدوده که احتمال ایجاد کم‌ترین آسیب را به میزان مطلوبیت

زیستگاه در دسترس خواهد داشت محدوده عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر و سرعت ۰/۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه است.



شکل ۳- منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی (عمق، سرعت و شاخص کانال) سیاه‌ماهی در رودخانهٔ زرین‌گل

Figure 3- Habitat Suitability Curves (Depht, Velocity and Substrtes Index) of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river

نتایج مطالعات دیگر نشان می‌دهد که فاکتور سرعت و عمق دو فاکتور غالب و موثر در پراکنش و فراوانی افراد گونه های ماهیان در زیستگاه است. این در حالی است که تأثیرات متغیر سرعت در ترجیح زیستگاهی ماهیان بیشتر از عمق است (۲، ۵، ۱۱ و ۱۷). همچنین ارتباط مثبت شاخص بین شاخص مطلوبیت زیستگاه با قطر متوسط سنگ بستر نشان دهنده نقش مثبت قطعات سنگی بزرگ در افزایش تعداد گونه سیاه‌ماهی در رودخانه زرین‌گل است. مطالعات نشان داده‌اند که نوع و اندازه مواد تشکیل دهنده بستر و سرعت جریان، فاکتورهای مهمی در انتخاب زیستگاه بوده و اجتماعات بزرگی از آبزیان به شدت با ترکیب بستر و در نتیجه سرعت جریان مرتبط هستند (۱۲، ۲۳ و ۳۰). ذرات شن متوسط به دلیل اینکه برای تخم‌ریزی سیاه‌ماهی ایده‌آل است، دارای مطلوبیت کمی برا ماهیان بالغ است. در همین حال، شن متوسط با توجه به تخم‌ریزی نکردن ماهیان جوان، هیچ مطلوبیتی برای این گروه سنی سیاه‌ماهی ندارد.

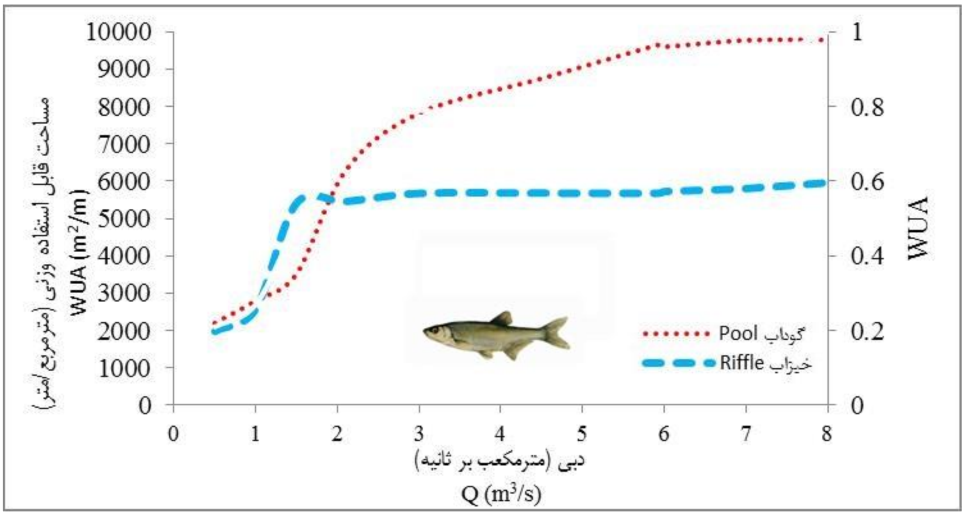
بالاتر بودن مطلوبیت بسترهایی که قطعات سنگی بزرگ دارند به دلیل این است که قطعات بزرگ سنگی می‌توانند به منزله پناهگاهی در برابر دبی زیاد جریان استفاده شوند و به علت ایجاد سطح بزرگتر و فضای مرده بیشتر در پشت سنگ، تراکم بیشتری از مواد غذایی آبزی دارند که در زیر سنگ‌های بستر رشد می‌کنند.

با تولید و توسعهٔ منحنی‌های شاخص مطلوبیت زیستگاه و ورود آن به مدل PHABSIM، مساحت قابل استفادهٔ وزنی برای گروه‌های سنی سیاه‌ماهی استخراج گردید و برای دبی‌های مختلف در مدل PHABSIM، منحنی دبی فیزیک زیستگاه در زیستگاه‌های خیزاب و گوداب استخراج گردید. تفاوت بین حداقل و حداکثر مقادیر مساحت قابل استفاده وزنی با توجه به دبی جریان در زیستگاه‌های مختلف و مراحل زندگی سیاه‌ماهی نشان می‌دهد که نیاز به تجزیه و تحلیل‌های دقیق مبتنی بر مطلوبیت زیستگاه در تمامی مراحل زندگی این گونه داریم. با یک ارزیابی کلی از وضعیت زیستگاهی سیاه‌ماهی در رودخانهٔ

زرین‌گل می‌توان شرایط زیستگاهی را تحلیل کرد. طبق منحنی دبی–فیزیک زیستگاه (شکل ۴) کاهش جریان در هر دو زیستگاه خیزاب و گوداب به میزان کم‌تر از حداقل میانگین دبی جریان رودخانه که برابر با ۱/۰۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، نیز باعث کاهش میزان مساحت قابل استفاده وزنی برای گروه سنی بالغ شده است. در گروه سنی بالغ، با افزایش دبی، شرایط فیزیک زیستگاه در حالت بهینه قرار خواهد گرفت. از منحنی دبی– فیزیک زیستگاه گروه سنی بالغ (شکل ۴) می‌توان نشان داد که در دبی معادل ۸ مترمکعب بر ثانیه و حدود ۳۸۰ درصد میانگین دبی سالانه، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی در زیستگاه گوداب برای سیاه‌ماهی بالغ است. همچنین مشاهده گردید که برای سیاه‌ماهی بالغ در زیستگاه گوداب، مطلوبیت زیستگاه بیشتر از خیزآب می‌باشد.

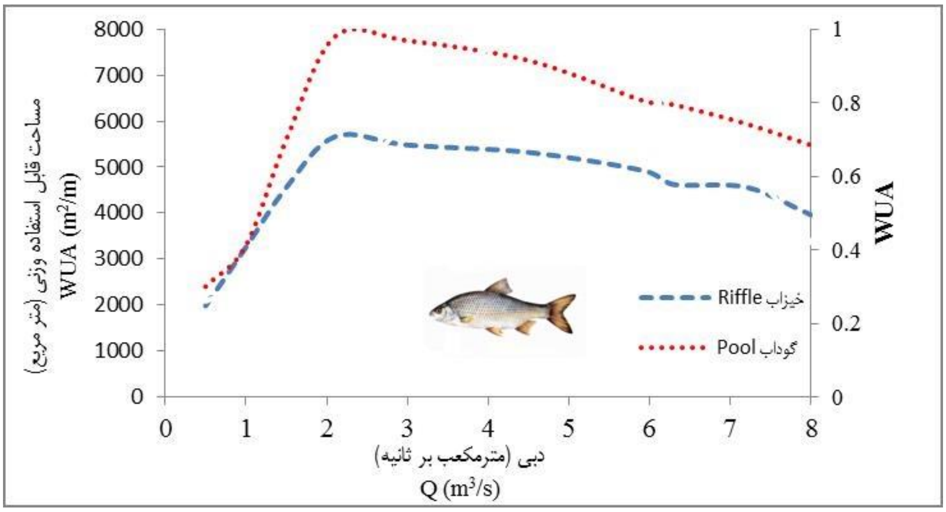
در شکل ۴ عکس‌العمل گروه سنی جوان سیاه‌ماهی در زیستگاه‌های مختلف، نسبت به تغییرات دبی متفاوت می‌باشد. طبق منحنی دبی–فیزیک زیستگاه (شکل ۴) در دبی‌های بالا و شرایط سیلابی میزان مساحت قابل استفاده برای گروه سنی جوان گونهٔ هدف کاهش می‌یابد، زیرا سیلاب‌ها، مورفولوژی و شرایط زیستگاهی رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به‌طوری‌که سیلاب‌های بزرگ و متوالی فرصت بازسازی زیستگاه‌ها را از رودخانه گرفته و زندگی ماهی‌ها را دچار مخاطره می‌کند. عکس‌العمل گروه سنی جوان نیز نسبت به تغییرات دبی در زیستگاه های گوداب و خیزاب، ابتدا کم بوده و سپس با افزایش دبی، شرایط زیستگاهی برای این گروه سنی بهبود می‌یابد. افزایش جریان به میزان بیش از حداکثر میانگین دبی ماهانه رودخانه (معادل ۵/۹۳ مترمکعب برثانیه)، باعث کاهش میزان زیستگاه برای گروه سنی جوان خواهد شد. همچنین حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی برای سیاه‌ماهی جوان در محدوده جریان میانگین دبی سالانه (معادل ۲/۱۱ متر مکعب برثانیه) در زیستگاه خیزاب می‌باشد. شایان توضیح است که در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر مساحت قابل استفاده وزنی با تقسیم بر بیشترین میزان زیستگاه در دسترس در هر گروه سنی و در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب بی‌بعد شده و در محور عمود سمت راست منحنی‌ها نشان داده شده است.

برای محاسبه رژیم جریان اکولوژیکی از روش شبیه سازی زیستگاه، با توجه به توضیحات ارائه شده درباره مساحت قابل استفاده وزنی و میزان زیستگاه در دسترس برای گونه هدف در رودخانه زرین‌گل، همچنین ملاحظات اکولوژیکی و میزان درصد کاهش زیستگاه تا مقداری که حداقل زیستگاه برای گونهٔ شاخص حفظ شود، معادل ۵۰ درصد حداکثر مساحت قابل استفادهٔ وزنی و به تبع آن ۷۵ درصد حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی به عنوان سطح حفاظتی متوسط در تحلیل اکولوژیک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرح روش تحقیق داده شده، نتایج تحلیل رژیم اکولوژیکی ماهانه پیشنهادی مدل اکوهیدرولیکی PHABSIM در مقابل میانگین جریان ماهانه در جدول ۶ استخراج شده است. مطابق با جدول ۶ محدوده جریان زیست‌محیطی برآورد شده برای گونهٔ سیاه‌ماهی با استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه بین ۰/۵۸ تا ۲/۴۹ متر مکعب بر ثانیه (به ترتیب در ماه‌های آبان و فروردین)، با میانگین ۱/۲۵ متر مکعب برثانیه (معادل ۵۹ درصد جریان طبیعی رودخانه) که بایستی در داخل رودخانهٔ زرین‌گل برای حفظ حیات اکوسیستم و حفاظت اکولوژیکی گونهٔ سیاه‌ماهی (معادل سطح حفاظتی متوسط) برقرار باشد.



شکل ٤- منحنی دبی- فیزیک زیستگاه در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب گروه سنی بالغ سیاه‌ماهی

Figure 4- Flow-Habitat Physics Curve in Pool and Riffle Habitats age stage Adult of *C. capoeta gracilis*



شکل ۵- منحنی دبی- فیزیک زیستگاه در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب گروه سنی جوان سیاه‌ماهی

Figure 5- Flow-Habitat Physics Curve in Pool and Riffle Habitats age stage Juvenile of *C. capoeta gracilis*

جدول ٦- توزیع ماهانه جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل

Figure 6- Monthly distribution environmental flow of Zarrin-Gol river with different methods

ماه Month	MMF (m^3/s)	$Q_{Tennant}$ (m^3/s)	$Q_{FDC-Shifting}$ (m^3/s)	$Q_{PHABSIM}$ (m^3/s)
October- September مهر	1.16	0.21	0.56	0.64
November- October آبان	1.05	0.21	0.52	0.58
December- November آذر	1.06	0.21	0.55	0.61
January- December دی	1.17	0.21	0.57	0.72
February- January بهمن	1.52	0.21	0.73	1.23
March- February اسفند	2.69	0.21	1.22	1.88
April- March فروردین	5.93	0.63	1.79	2.49
May- April اردیبهشت	4.47	0.63	1.43	2.2
June- May خرداد	2.34	0.63	0.96	1.81
July- June تیر	1.57	0.63	0.74	1.34
August- July مرداد	1.24	0.63	0.57	0.77
September- August شهریور	1.19	0.63	0.56	0.74
Average میانگین	2.11	0.42	0.85	1.25

همان‌طور که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، مدل شبیه‌سازی زیستگاه، رژیم جریان اکولوژیکی را در همه ماه‌ها، بیشتر از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان و بر اساس میزان مطلوبیت زیستگاه و مرحله زندگی گونه شاخص پیشنهاد داده است. مقایسه نتایج جریان برآورد شده زیست‌محیطی (جدول ۶) از روش انتقال منحنی تداوم جریان با نتایج روش تنانت به‌روشنی نشان می‌دهد که روش انتقال منحنی تداوم جریان در همه ماه‌های سال به استثنای ماه‌های مرداد و شهریور مقدار جریان زیست‌محیطی را بیشتر از روش تنانت برآورد کرده است. روش تنانت را می‌توان به عنوان مدلی جهت توسعه سطوح جریان حداقل در سطح برآورد اولیه حوضه آبریز در ایران (به جز نواحی خشک و نیمه خشک و آبراهه‌هایی که برای چندین ماه خشک است) بکار برد (۱۵، ۲۰ و ۲۲). اصلاح و منطقه‌ای کردن روش تنانت در ایران، مستلزم عملیات صحرایی گسترده و نیازمند جمع‌آوری داده‌های بیولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه‌های مورد مطالعه، برای فراهم کردن روابط بین دبی و مطلوبیت و قابلیت زیستگاه فیزیکی می‌باشد (۲۲ و ۲۳). با توجه به جدول ۶، تحلیل اساسی بر جریان زیست‌محیطی در رودخانه زرین‌گل می‌توان ارائه داد. در رودخانه زرین‌گل با توجه به اختلاف میان مساحت مطلوب زیستگاهی در دوره‌های کم‌آبی (مهر، آبان و آذر) تا پرآبی (فروردین)، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که برداشت کمتری از آب رودخانه زرین‌گل امکان‌پذیر است و در دوره‌های کم‌آبی، شرایط بحرانی در میزان مساحت مطلوب زیستگاهی وجود

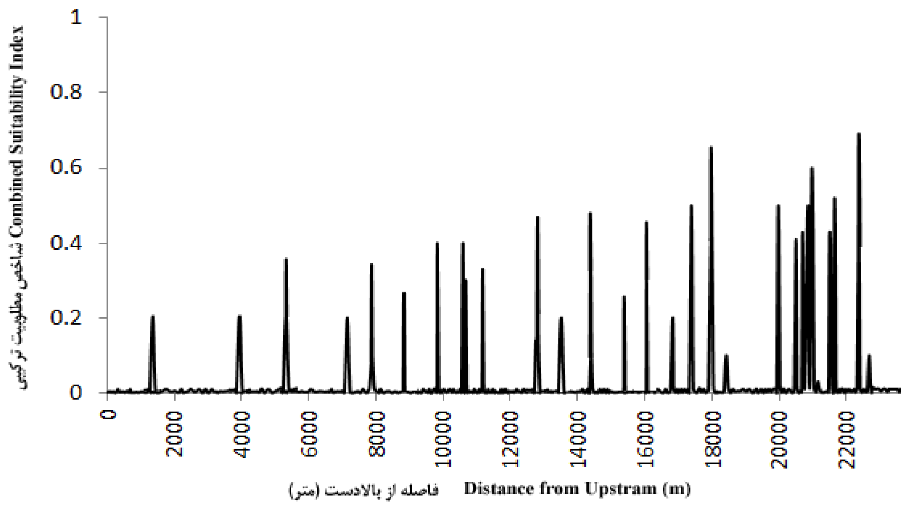
دارد و برداشت بیش از حد آب رودخانه در مصارف مختلف مانند کشاورزی، عملاً رودخانه را در بحران اکولوژیکی فرو خواهد برد و در مدیریت رودخانه باید تمهیدات و برنامه‌ریزی‌هایی را لحاظ کرد. با توجه به جدول ۶، این نتیجه‌گیری به عمل می‌آید که مدل PHABSIM قادر به ارائه رژیم اکولوژیکی رودخانه از دو نقطه‌نظر علمی و عملی می‌باشد که با نتایج تحقیق وانگ و همکاران (۲۷) و وای و همکاران (۲۸) مطابقت دارد. آرماس وارگاس و همکاران (۳) در مطالعه رژیم جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست رودخانه دورو مکزیک با استفاده از مدل PHABSIM و منحنی‌های دبی – مساحت قابل استفاده وزنی برای ۵ گونه ماهی، میانگین جریان زیست محیطی ایده‌آل و مطلوب را برای ماه‌های آوریل تا ژوئن به ترتیب بین ۵ تا ۱۱/۵ مترمکعب برثانیه و برای ماه‌های جولای تا اکتبر به ترتیب بین ۷/۵ تا ۲۰ مترمکعب برثانیه برآورد کردند. نتایج ایشان نشان داد، رژیم جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته، قادر به حفاظت از ۸۰ درصد رژیم جریان طبیعی برای نگهداری از ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه و استقرار شرایط مطلوب برای زیستن گونه‌های آبزی می‌باشد. نیک‌قلب و همکاران (۲۰)، نادری و همکاران (۱۵) و نادری و همکاران (۱۷) در تعیین دبی موردنیاز برای ادامه چرخه طبیعی زندگی ماهیان رودخانه‌های مورد مطالعه‌شان با استفاده از مدل میکروزیستگاهی PHABSIM، این مدل را به عنوان ابزاری برای معرفی یک رژیم جریان مطلوب، قابل اعتماد دانستند.

در ادامه، اعتبار مدل PHABSIM مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تراز سطح آب و سرعت شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در مقاطع کنترل (ایستگاه‌های نمونه‌برداری) مورد واسنجی و سپس اعتبارسنجی صورت گرفت. بر این اساس صحت و دقت نتایج مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده در سطح ۵ درصد اطمینان مورد تایید می‌باشد که این نشان‌دهنده توانایی مدل PHABSIM برای واسنجی داده‌های ورودی و قابلیت اعتماد ماژول‌های هیدرولیکی STGQ، MANSQ یا WSP برای شبیه‌سازی است. همچنین تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده فیزیک زیستگاه بین ۳ تا ۲۱ درصد بوده و در دبی‌های کم تفاوت بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده کم می‌باشد. اختلاف کم خطا بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی عملکرد خوب مدل PHABSIM، توانایی آن را در شبیه‌سازی پارامترهای فیزیک زیستگاه تأیید می‌نماید.

در شکل ۶ و ۷ توزیع مکانی مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه زرین‌گل برای دبی متوسط سالانه (۲/۱۱ متر مکعب بر ثانیه) برای دو گروه سنی سیاه‌ماهی نشان داده شده است. محور عمودی در این شکل‌ها، شاخص مطلوبیت ترکیبی است که در رابطه ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ و ۷ مشاهده می شود، میزان مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه شرایط کاملاً متفاوتی دارد. توزیع مطلوبیت زیستگاهی در دبی‌های مختلف نشان داد که به طور کلی محدوده بالادست رودخانه به لحاظ مطلوبیت پارامترهای فیزیک زیستگاه در دبی‌های مختلف دارای ضعیف‌ترین شرایط بوده و در محدوده پایین‌دست رودخانه شرایط مطلوب‌تری مشاهده می‌شود. دلیل آن نیز کاهش شیب رودخانه و در نتیجه کاهش سرعت جریان رودخانه و افزایش عمق به سمت پایین‌دست رودخانه می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های مربوط به بررسی توزیع مطلوبیت در طول رودخانه دیده می‌شود، نوسانات مشاهده شده در پراکنش سیاه‌ماهی در ایستگاه‌های مختلف نیز به دلیل تغییر در شرایط هندسی و هیدرولیکی در طول رودخانه می‌باشد که داده های میدانی موجود در رابطه با تعداد و پراکنش سیاه‌ماهی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه زرین‌گل نیز صحت این مطلب را تأیید می‌کند. همچنین مطابق با تحقیقات اسدی و همکاران (۵)، قلی‌زاده و همکاران (۱۱)، نادری و همکاران (۱۶) و ژائو و همکاران (۳۰) فراوانی گونه‌های مختلف ماهی وابسته به توزیع زیستگاه‌های مطلوب در طول رودخانه می‌باشد و با افزایش مطلوبیت زیستگاه، تعداد ماهی نیز افزایش خواهد یافت.

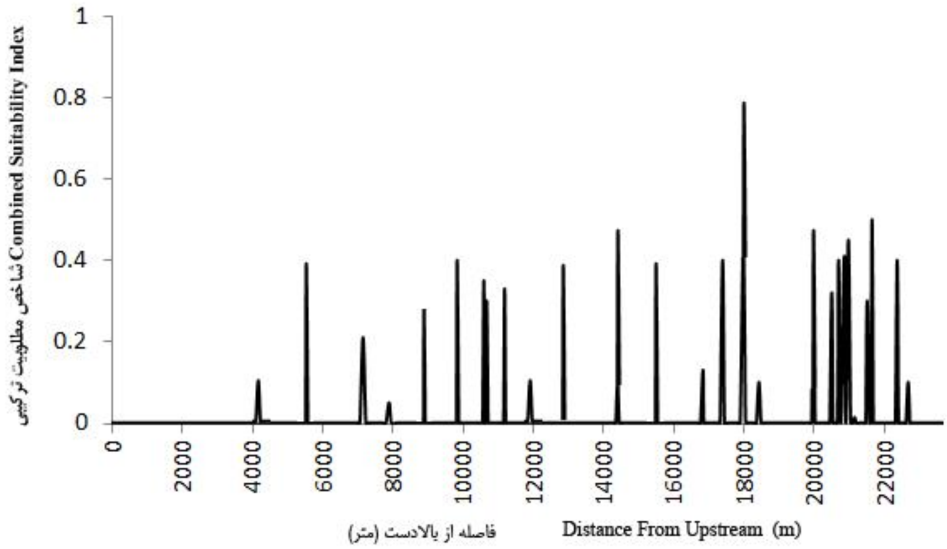
خصوصیات رودخانه‌ها، از اهمیت زیادی در تعیین شرایط کیفی آب، نوع گونه ماهی و پراکنش ماهی دارد. اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی در رودخانه زرین‌گل نشان‌دهنده تنوع در ایستگاه‌های نمونه‌برداری می‌باشد. بر این اساس در طول سال در اکثر ایستگاه‌ها، سگ‌ماهی جویباری و سیاه‌ماهی وجود داشتند و بیش‌ترین فراوانی و پراکنش مربوط به این دو گونه بود که می‌توان علت آنرا به اشتراک در میدان اکولوژی[1] دانست (۹). میدان اکولوژی، نمایانگر عمل یک موجود زنده در اکوسیستم می‌باشد. قرار گرفتن دو گونه در یک زیستگاه را اصل طرد رقابتی می‌نامند، بدین مفهوم که دو گونه از موجود زنده، می‌توانند هم‌آشیان باشند (۲۸). برون و همکاران (۹) به این موضوع که در اکثر گرادیان‌های اکولوژیکی، بیشتر گونه‌ها به‌نظر می‌آید که از یک سو نسبت به شرایط فیزیکی واکنش نشان می‌دهند و از سوی دیگر تحت تأثیر شرایط بیولوژیکی باشند، اشاره کردند. تنوع زیستگاه‌های رودخانه‌ای می‌تواند اثرات مطلوب مختلفی روی ترکیب گونه‌های ماهیان داشته باشد (۱۷ و ۲۸). در ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه زرین‌گل، پوشش گیاهی آن و سایه ناشی از آن، کمتر از ایستگاه‌های بالادست می‌باشد. کم بودن پوشش گیاهی و سایه ناشی از آن، عمق کم و پایین بودن شدت جریان، منجر به رسیدن نور کافی به بستر رودخانه شده (انرژی خورشیدی بیشتری را دریافت می‌کند) و نسبت بالایی از گونه‌های ماهیان را در این بازه مشاهده می‌نمائیم.

1- Ecological Niche



شکل ٦- توزیع مطلوبیت زیستگاهی برای گروه سنی بالغ سیاه‌ماهی در رودخانه زرین‌گل

Figure 6- Habitat suitability distribution for age stage Adult of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river



شکل ۷- توزیع مطلوبیت زیستگاهی برای گروه سنی جوان سیاه‌ماهی در رودخانه زرین‌گل

Figure 7- Habitat suitability distribution for age stage Juvenile of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river

رژیم جریان رودخانه، نقش مهمی در زیستگاه‌های پایین‌دست دارد و باعث ایجاد تغییر در مورفولوژی و کیفیت آب در قسمت پایین دست می‌شود. ماهیان برای تولیدمثل از فضای بین ذرات درشت دانه استفاده کرده و در محیط شنی فضای مناسبی برای تخم‌گذاری فراهم می گردد. به علت فرآیند رسوب‌گذاری در اثر کاهش سرعت جریان، ذرات ریزدانه در فضای بین ذرات درشت دانه ته‌نشین شده و در دوره تخم‌گذاری ماهیان مخاطره‌آمیز خواهد بود (۱۹ و ۲۹). لذا بایستی جریانی در نظر گرفته شود که این ذرات ریزدانه را شستشو داده و شرایط طبیعی را به رودخانه برگرداند. به همین دلیل برای آماده‌سازی محیط رودخانه نیاز است که زمان و شدت جریانات در مطالعات زیست محیطی منطقه مشخص گردد. به طور خاص، چنین تغییرات مورفولوژیکی، اکوسیستم‌های آبزی را تغییر می‌دهد و در نتیجه مطلوبیت زیستگاه و زیستگاه‌های تخم‌ریزی گونه‌های آبزی را افزایش می‌دهد (۱۷ و ۳۰). نتایج پژوهش های متعدد دیگری نیز در مورد اهمیت رژیم جریان‌های قوی (سیلاب‌های بزرگ) در ساختار زیستگاه‌های رودخانه‌ای نشان می‌دهد بر اساس تغییرپذیری عمق و

سرعت جریان و شاخص اکوهیدروموفولوژیکی، با وقوع سیل طبیعی در امتداد رودخانه، فرصتی را برای تأمین و بهبود شرایط مناسب زیستگاه رودخانه بوجود می آورد (۱۷، ۱۹، ۲۷ و ۲۹). یکی از مهم ترین مزیت‌های رویکرد شبیه‌سازی زیستگاه این است که می‌تواند تغییرات رژیم جریان مانند تغییرات فصلی و یا سیلاب را درنظر بگیرد و از جریانات سیلابی در تأمین نیازهای بیولوژیکی استفاده کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه از اعتبار بالایی در سطح جهان برخوردار می‌باشند (۳، ۱۶، ۱۷، ۲۰ و ۲۷). علیرغم تحقیقات طولانی مدت در مورد استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه برای پیش‌بینی پاسخ اکولوژیکی ماهیان به تغییرات فیزیکی زیستگاه، کاربرد عملی آنها در ارزیابی جریان‌های زیست محیطی به دلایلی عمدتا مرتبط با هزینه–اثربخشی، بهره‌وری در زمان، تخصص مورد نیاز و در دسترس بودن اطلاعات، محدود شده است. بارزترین نکته موجود در پژوهش حاضر این است که انتخاب و اجرای مقادیر دبی زیست‌محیطی در اختیار مدیر حوضه آبخیز رودخانه است که کدام یک از مقادیر گزارش شده توسط روش‌های مورد مطالعه را برگزیند. در نهایت دستاورد پژوهش حاضر، ایجاد شرایط مطلوب و مناسب برای تأمین سلامت اکوسیستم رودخانه زرین‌گل از نظر فراهم نمودن زیستگاه موجودات زنده، با اعمال میزان جریان اکولوژیک که بیشترین تشابه را با الگوی طبیعی جریان رودخانه دارد، می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تخصیص جریان زیست‌محیطی، تنظیم، مقدار و زمان‌بندی آن با توجه به نقش مؤثری که در ادامه فعالیت‌های موجود در زیست‌بوم، بوجود آوردن شرایط مناسب برای تخم‌ریزی آبزیان و احیا اکوسیستم رودخانه دارد، مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM را به عنوان رویکردی نو در مدیریت جامع زیستگاهی رودخانه زرین‌گل مطرح می‌کند. با استفاده از این مدل می‌توان، مناطق بهینه برای زیست ماهی را با توجه به تأثیر عوامل غیرزیستی (فیزیک زیستگاه) در رودخانه تعیین کرد و از آن برای مدیریت اکوسیستم رودخانه و تخمین جریانات اکولوژیک بهره گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، حداقل و حداکثر جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل با استفاده از مدل PHABSIM به ترتیب برای ماه آبان و فروردین معادل ۰/۵۸ و ۲/۴۹ متر مکعب برثانیه با میانگین دبی سالانه ۱/۲۵ متر مکعب بر ثانیه بایستی در طول رودخانه زرین‌گل برای حفظ شرایط مطلوب و محافظت از اجزای اکوسیستم رودخانه برقرار باشد. نتایج بررسی‌های این پژوهش نشان داد ترجیح زیستگاهی گونه سیاه‌ماهی در رودخانه زرین‌گل، مناطق گوداب و جریان‌دار می‌باشد و بر این اساس حداکثر میزان زیستگاه در دسترس برای سیاه‌ماهی بالغ در دوره پرآبی رودخانه معادل ۹۷۸۷ متر مربع بر متر و برای سیاه‌ماهی جوان در متوسط جریان سالانه برابر ۵۷۸۲ متر مربع بر متر می‌باشد. تحقیق حاضر جزو اولین پژوهش‌های انجام شده در زمینه توسعهٔ شاخص‌های اکوهیدرولیکی– اکوهیدروموفولوژیکی در رودخانه‌های حوضهٔ جنوب شرقی دریای خزر است. در این راستا، استفاده از مدل PHABSIM برای شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه و همچنین تجزیه و تحلیل‌های دقیق مبتنی بر مطلوبیت زیستگاه گونهٔ هدف، می‌تواند به پیش‌بینی دینامیک زیستگاه برای محافظت از زیستگاه مناسب ماهی در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، مدیریت اکوسیستم رودخانه و برنامه‌ریزی منابع آب در برخی از حوضه‌های آبخیز کمک کند. همچنین بررسی رویکرد رهاسازی سیلاب مدیریت شده برای حفظ شرایط هیدرولیکی زیستگاه و حفظ تعادل فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی و نیز مدل‌سازی پیشرفته اکوهیدرولیکی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی و حفاظت زیستگاه ماهیان در رودخانه‌های تنظیم شده، به عنوان مطالعات آینده، پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌های ارزنده اعضای هیئت علمی گروه شیلات دانشگاه‌های علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و گنبدکاووس، همچنین از همفکری‌های سرکارخانم دکتر محبوبه حاجی اسماعیلی و جناب آقای مهندس سعید نیک‌قلب، همراهی و همکاری تیم مطالعات میدانی و نیز از نقطه‌نظرات و پیشنهادات داوران گرامی که باعث ارتقای پژوهش حاضر گردید، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

1- Abdoli A., and Naderi M. 2009. Biodiversity of Fishes of the Southern Basin of the Caspian Sea. Abzian Scientific Publication. (In Persian)

2- Ahmadzadeh M., Poorbagher H., and Eagderi S. 2018. Calculating the habitat suitability index of Siahmahi (*Capoeta buhsei*, Kessler 1877) using the kernel smoothing in the Jajrood River, Namak basin of Iran. Journal of Aquaculture Sciences 6(9): 99-108. (In Persian with English abstract)

3- Armas-Vargas F., Escolero O., Garcia de Jalon D., Zambrano L., Gonzalez del Tanago M., and Kralisch S. 2017. Proponiendo el caudal ambiental basado en simulacion del habitat fisico para cinco especies de peces en la Cuenca baja del Rio Duero, Mexico. Hidrobiologica 27(2): 185-200.

4- Arthington A.H., Kennen J.G., Stein E.D., and Webb J.A. 2018. Recent advances in environmental flows science and water management—Innovation in the Anthropocene. Freshwater Biology 1-13.
5- Asadi H., Sattari M., and Eagdari S. 2014. Investigation of the determinants of selectivity and preferential habitat Capoeta capoeta gracilis (Keyserling 1891) in the Siahrood River. Iranian Journal of Fisheries Science 23(3): 1-9. (In Persian)
6- Ayyoubzadeh S.A., Sedighkia M., and Hajiesmaeili M. 2018. Ecohydraulics and Simulation of River Habitats.Water Engineering Research Institude Tarbiat Modares University. (In Persian)
7- Azarang F., Telvari A.R., Sedghi H., and Shafaei Bajestan M. 2017. Large Dam Effects on Flow Regime and Hydraulic Parameters of river (Case study: Karkheh River, Downstream of Reservoir Dam). Journal of Water and Soil 31(1): 11-27 (In Persian with English abstract)
8- Bourgeois G., Cunjak R.A., Caissie D., and El-Jabi N. 1996. A spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile Atlantic salmon in a small stream. North American Journal of Fisheries Management 16(1): 154-166.
9- Brown J.H., Stevens G.C., and Kaufman D.M. 1996. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. Annual Review of Ecology and Systematics 27(1): 597-623.
10- Esmaili K., Sadeghe Z., Kaboli A., and Shafaei H. 2018. Application Hydrological methods for estimating River Environmental water rights (Case Study of Gorganroud River). Journal of Natural Environmenatal (Iranian Journal of Natural Recorces) 71(4): 437-451. (In Persian with English abstract)
11- Gholizadeh M., Toomaj A., and Hossiendost S. 2017. Modeling habitat requirements of riverine stone loach, Paracobitis hircanica (Teleostei: Nemacheilidae) in the Zarin-Gol River, Caspian Sea basin, Iran. Iranian Journal of Ichthyology 4(4): 340-351.
12- Gholizadeh M., Patimar R., and Harsij M. 2018. Investigation of Selected Habitat Range of the Paracobitis hicanica in the Zarin-Gol River, Golestan Province. Journal of Applied Ichthyological Research 6(2): 1-12. (In Persian)
13- Kim J.S., Lee C.J., Kim W., and Kim Y.J. 2010. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. Water Science and Engineering 3(2): 217-232.
14- Mostafavi S., and Yasi M. 2015. Evaluation of Environmental Flows in Rivers Using Hydrological Methods (Case study: The Barandozchi River- Urmia Lake Basin). Journal of Water and Soil 29(5): 1219-1231. (In Persian with English abstract)
15- Naderi M.H., Zakerinia M., and Salarizji M. 2018. Application of the PHABSIM model in Explaining the Ecological Regime of the River in order to Estimate the Environmental Flow and Compare with Hydrological Methods (Case Study: Gharasoo River). Ecohydrology 5(3): 941-955. (In Persian)
16- Naderi M.H, Zakerinia M., and Salarijazi M. 2019. Investigation of Ecohydraulic Indices in Environmental Flow Regime and Habitat Suitability Simulation Analysis using River2D Model with Relying on the Restoration Ecological in Zarrin-Gol River. Journal of Ecohydrology 6(1): 205-222. (In Persian)
17- Naderi M.H, Pourgholam-Amiji M., Ahmadaali K., Amiri Z., Ghojoghi A., and Ghorbani Minaei L. 2020. Determining the Range of Optimal Environmental Flow in Zarin-Gol River through Hydromorphological Characteristics, Hydrological Regime and Habitat Suitability Simulation Ecohydraulic Model. Journal of Fisheries (Iranian Journal of Natural Recources) 71(3): 317-328. (In Persian with English abstract)
18- Najafabadi E.F., Afzalimehr H., and Rowinski P.M. 2018. Flow structure through a fluvial pool-riffle sequence–Case study. Journal of Hydro-environment Research 19:1-15.
19- Nakvachara P., Rittima A., and Talaluxmana Y. 2018. Quantification of Environmental Flow Requirement of Khun Dan Prakan Chon Dam Using Hydrological-hydraulic-ecological Methods. Applied Environmental Research 40(2): 76-90.
20- Nikghalb S., Shokoohi A., Singh V.P, and Yu R. 2016.Ecological regime versus minimum environmental flow: comparison of results for a river in a semi Mediterranean region. Water Resources Management 30(13): 4969-84.
21- Olsen N. 2012. Numerical Modelling & Hydraulics, 3rd Edition, Department of Environmental Engineering: The Norwegian University of Science & Technology.
22- Sedighkia M., Ayyoubzadeh S.A., and Hajiesmaeli M. 2017. Modification of Tennant and Wetted Perimeter Methods in Simindasht Basin, Tehran Province. Civil Engineering Infrastructures Journal 50(2): 221-31.
23- Sedighkia M., Abdoli A., Ayyoubzadeh S.A., Ahmadi A.A., and Gholizadeh M. 2017. Development of the native method of environmental flow in the rivers of the southern basin of Kaspian-Lar National Park. Journal of Ecology 43(3): 543-560. (In Persian)
24- Shamekhi K., Patimar R., Ghorbani R., and Kordjazi Z. 2012. Comparison relative of abundance of Capoeta capoeta gracilis in five streams of Gorganroud River Basin, Golestan Province, Northern Iran. Journal of Research in Biology 1: 19-22.
25- Smakhtin V.U., and Anpurhas M. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. IWMI Research Report 107. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

26- Tennant D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries 1(4): 6-10.
27- Wang H., Wang H., Hao Z., Wang X., Liu M., and Wang Y. 2018. Multi-Objective Assessment of the Ecological Flow Requirement in the Upper Yangtze National Nature Reserve in China Using PHABSIM. Water 10(3): 1-16.
28- Yi Y., Cheng X., Yang Z., Wieprecht S., Zhang S., and Wu Y. 2017. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68: 748-762.
29- Zarakani M., Shookohi A., and Pising V. 2017. Introducing a comprehensive ecological diet in the absence of data to determine the true environmental status of rivers. Iranian Water Resources Research Journal 13(2): 140-153. (In Persian with English abstract)
30- Zhao C.S., Yang S.T., Zhang H.T., Liu C.M., Sun Y., Yang Z.Y., Zhang Y., Dong B.E., and Lim R.P. 2017. Coupling habitat suitability and ecosystem health with AEHRA to estimate E-flows under intensive human activities. Journal of Hydrology 551: 470-483.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 3, July-August 2020, p. 515-532

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۹، ص. ۵۳۲-۵۱۵

Design and Analysis of Optimal Ecological Flow Regime Zarrin-Gol River Using Hydrological Methods and Ecohydraulic Habitat Simulation Model

M.H. Naderi[1]- M. Zakerinia[2*]- M. Salarijazi[3]

Received: 06-03-2019
Accepted: 12-04-2020

Introduction: The field of ecohydraulics is rapidly growing as the society requires a better understanding of the interrelations amongst the dynamics of the physical processes pertaining to aquatic ecosystems and the modifications observed in their habitat as well as the biological responses of the organisms. Environmental flow science is a common tool for assessing the consequences of changing the flow regime of aquatic ecosystems and providing a minimum flow of aquatic species protection. Environmental Flows assessment is a global challenge involving a number of tangible and intangible segments of hydrology, hydraulics, biology, ecology, environment, socio-economics, and several other branches of engineering including water resources management. River impoundment (dams, weirs), water diversions and consequent modifications to flow regimes have highly destructive effects on aquatic species and ecosystems.

Materials and Methods: In this research, two most common hydrologic methods Tennant and FDC Shifting were compared with a habitat simulation method i.e. PHABSIM. Tennant method is the most popular hydrological method in rivers and is based on the historic flow data. Investigation of the relationship between hydrologic approaches and physical habitat simulation approach and presentation of new recommendations based on the ecological and hydrological data can be very useful for estimating environmental flow in planning phase of river projects. We used river habitat simulation program to model the depth and velocities around boulder clusters to evaluate the habitat for Capoeta habitat in Zarrin-Gol River. The Zarrin-Gol River is one of the rivers in Golestan province in northern Iran. The statistics required for hydrologic calculations were also collected from Zarrin-Gol hydrometry station during the 42-year statistical period (1353-1395). In this regard, after the field studies and the development of the habitat suitability model for the target species, the Habitat simulation of the flow was carried out and eventually the ecological flow regime was extracted. In order to identify the important habitat variables and assess their impact, the life pattern of fish species was divided into juvenile and adult life stages.

Results and Discussion: Based on ecological assessment, the environmental water requirement of Gharahsoo river is 30% of mean annual flow for spring and summer and 10% of mean annual flow for autumn and winter seasons. It was found that application of Tennant and FDC Shifting methods led to dramatically low discharges as fixed minimum environmental flows, while habitat simulation method gave an acceptable estimation of ecological regime. However, habitat simulation technique assesses the allowable value of extraction from river flow dynamically, considering the ecological condition and average intermediate values. River conditions including flow velocity, water depth and river bed substrate are combined to form unique habitats facilitating the survival and growth of fish species populations. Habitat forms are observed in a wide range of rivers depending on the diet and the river type such as Pool, Riffle and Run. The destruction of the Riffle substrate causes disruption and impacts the biological integrity of the current. According to the Q-WUA curve of the Riffle habitat in high waters and flood conditions, the area available for juveniles of the target species decreases because of the flood, morphology and habitat of the river, so large and continuous floods inhibit the opportunity to rebuild habitats from the river and endanger the lives of fish. One of the factors limiting the desirability of the habitat and thus reducing the available habitat in low river flows is the low flow velocity, as well as high stream flow flows. The maximum and minimum flow regime, required to maintain the Zarrin-Gol river ecosystem according to ecological needs, was 2.49 and 0.58 m3/s in April and November, respectively, with an average value of 1.25 m^3/s (59 % of natural stream of the river). In the next step, habitat suitability distribution along the stream was investigated. This was performed for the full range of discharges. Habitat suitability distribution along the stream at different discharges indicated that the upstream part of the stream had the poorest habitat condition and moving towards the downstream parts, the habitat suitability

1, 2 and 3- Graduate M.Sc. of Water Resources Engineering, Associate Professor and Assistant Professor of Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mzakerinia@gau.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i3.79294

condition was improved.

Conclusion: Application of the Tennant method based on a hydrological system can be an inappropriate choice for determining the minimum flow to maintain the ecological environment of the river. According to the results, the PHABSIM model can simulate flow, habitat suitability of target species and the habitats dynamics accurately, which is highly required to protect the proper habitat of fish in river ecosystems.

Keywords: Environmental flow, Habitat simulation, Hydrological methods, Zarrin-Gol river